

УДК [550.837.311 + 550.837.81+550.834.5]

В.А. Куликов¹, С.А. Аношина², А.А. Бобачев³, А.В. Соловьева⁴,
А.М. Турчков⁵, А.Г. Яковлев⁶

КОМПЛЕКСНЫЕ ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОЗОВОГО ТЕЛА В КАЛУЖСКОЙ ОБЛАСТИ

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», геологический факультет.
119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, 1

ООО «Северо-Запад». 117545, Москва, 1-й Дорожный проезд, д. 9, стр. 1, офис 2

Moscow State University, Faculty of Geology. 119991, Moscow, GSP-1, Leninskiye Gory, 1

LTD «Nord-West». 117545, Moscow, 1st Road passage, house 9, building 1, office 2

Описаны комплексные геофизические исследования, выполненные над озовым телом в Калужской области. В частности, изучена аномалия кажущейся поляризуемости. Комплексная интерпретация геофизических данных, сопоставление с результатами бурения, а также данные измерений на образцах керна позволили уточнить природу аномалии и подтвердить наличие в пределах отложений песчано-гравийной смеси участков с высоким процентным содержанием гравия и гальки магматического происхождения, которые характеризуются повышенными значениями электрической поляризуемости.

Ключевые слова: электроразведка, вызванная поляризация, ледниковые отложения, песчано-гравийная смесь.

This paper describes complex geophysical studies conducted on an asar body in the Kaluga region. In particular, the anomaly of the apparent polarizability is studied. Complex interpretation of geophysical data, comparison with drilling results, as well as measurements on drill samples made it possible to define the nature of the anomaly and confirm the presence of areas with a high percentage of magmatic gravel and cobble within the sand-gravel deposit, which are characterized by high values of electrical polarizability.

Key words: electrical exploration, induced polarization, glacial deposits, sand-gravel mixture.

Введение. В середине 1990-х гг. во время проведения первых учебных практик на полигоне «Александровка» геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова в Юхновском районе Калужской области геофизическими методами было выявлено крупное песчаное тело в районе урочища Косая Гора [Алексеев, 1996]. Бурение нескольких шнековых скважин (рис. 1) позволило установить, что тело имеет мощность 10–15 м и расположено внутри моренных отложений. Для более надежной идентификации моренных суглинков и песков в образцах, отобранных из шнековых скважин, использовался ситовой гранулометрический анализ.

Результаты бурения показали (рис. 2), что в подошве песков в наиболее прогнутых участках фиксируется пачка галечников или песка с галькой и валунами (скважины № 10, 12). Сверху в некоторых местах пески перекрыты тонким (до

4 м) слоем верхней морены или надморенными песками, образующими здесь сплошной покров. Ширина песчаного тела, прослеженная скважинами и геофизическими методами, вдоль дороги Беляево-Александровка составила около 1 км (рис. 3, а). Скважины № 9, 11, 13, пробуренные в стороне от дороги, не вышли из песчаного тела, причем в скважине № 9 зафиксирована максимальная мощность песка. Особенности строения песчаного тела указывают на то, что оно сложено потоковыми флювиогляциальными отложениями.

Материалы и методы исследований. В 2017 г. изученное ранее песчаное тело было пересечено во время проведения комплексных геофизических работ по региональному профилю № 2 (рис. 3, б). По результатам применения метода ВЭЗ определены его границы. На одном участке профиля в центральной части песчаного тела по результатам

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геофизических методов исследования земной коры, профессор, докт. геол.-минер. н.; e-mail: vic@nw-geo.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геофизических методов исследования земной коры, аспирант; e-mail: anoshinas21@gmail.com

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геофизических методов исследования земной коры, доцент, канд. физ.-мат. н.; e-mail: bobachev@gmail.com

⁴ ООО «Северо-Запад», геофизик, канд. геол.-минер. н.; e-mail: nastya_soloway@rambler.ru

⁵ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра сейсмометрии и геоакустики, ассистент; e-mail: turchkov@gmail.com

⁶ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геофизических методов исследования земной коры, доцент, канд. физ.-мат. н.; e-mail: mail@nw-geophysics.com

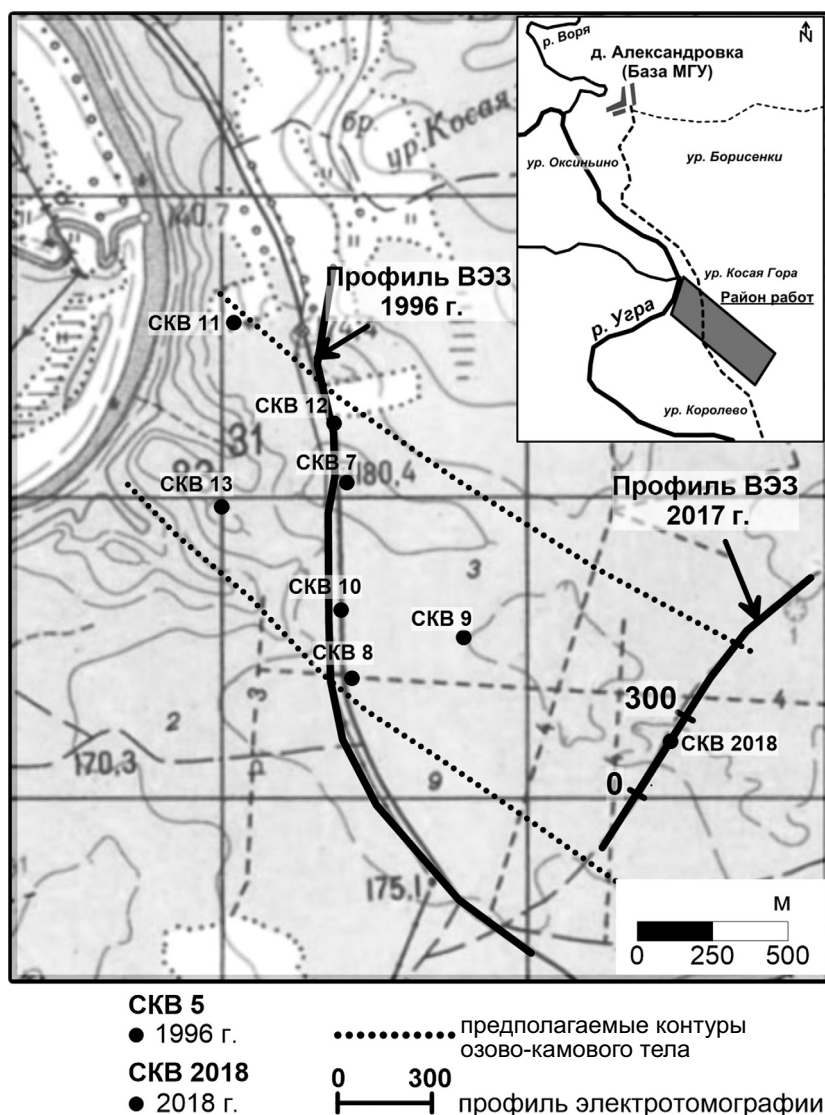


Рис. 1. Расположение профилей работ методами ВЭЗ, ЭТ, а также скважин в 1996 г. и 2018 г.

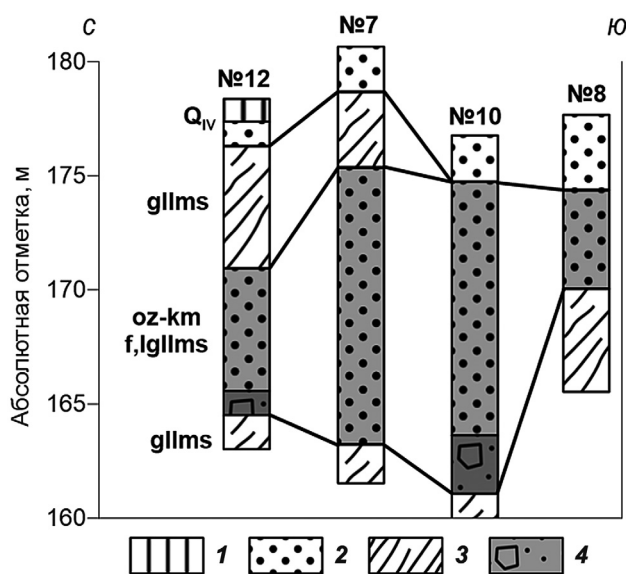


Рис. 2. Разрезы шнековых скважин в 1996 г.: 1 — почвенный слой; 2 — пески, 3 — суглинки, 4 — песчано-гравийные отложения

электроразведки выявлена интенсивная локальная аномалия кажущейся поляризуемости (рис. 4, б). Для уточнения причины возникновения аномалии на этом участке длиной 300 м были проведены детальные работы методом электротомографии с измерением полного спада поля вызванной поляризации, а также сейсмические работы методом ОГТ и пробурена скважина глубиной 30 м с отбором керна. Рассмотрим результаты детальных геофизических работ и бурения.

Электроразведка. Электроразведочные зондирования выполняли с помощью симметричной четырехэлектродной установки Шлюмберже (AMNB). Разносы питающей линии, размеры приемных линий и шаг по профилю были подобраны таким образом, чтобы одни и те же места многократно использовались для заземления приемных и питающих электродов, что позволяет рассматривать эту методику измерений как вариант электротомографии и использовать в дальнейшем для интерпретации двумерную автоматическую инверсию. Максимальный разнос установки АВ/2 — 105 м.

В питающую линию с помощью генератора тока ВП-1000 («ЭЛГЕО», г. Санкт-Петербург) подавался разнополярный прямоугольный импульс с паузой (2 с — импульс, 2 с — пауза). На приемной линии с

помощью 8-канального регистратора «ИМВП-8» (ООО «Северо-Запад», г. Москва) фиксировали полный сигнал, из которого с помощью специальных программ обработки рассчитывали кажущееся сопротивление (ρ_k) и кажущуюся поляризуемость $\eta_k = (U_{вп} / U_{пр}) \cdot 100\%$ на нескольких задержках.

Сейсморазведка. Сейсморазведочные работы методом отраженных волн в модификации общей глубинной точки (МОВ-ОГТ) были проведены по методике продольного профилирования по системе встречных и нагоняющих годографов с регистрацией поперечных волн горизонтальной поляризации (SH) по схеме Y—Y.

Схема наблюдений Y—Y реализуется таким образом, чтобы возбуждение и прием колебаний происходили в плоскости, перпендикулярной оси профиля. При такой методике возбуждаются и принимаются преимущественно поперечные волны горизонтальной поляризации (SH-волны).

Для возбуждения поперечных волн горизонтальной поляризации (SH-волн) использовали

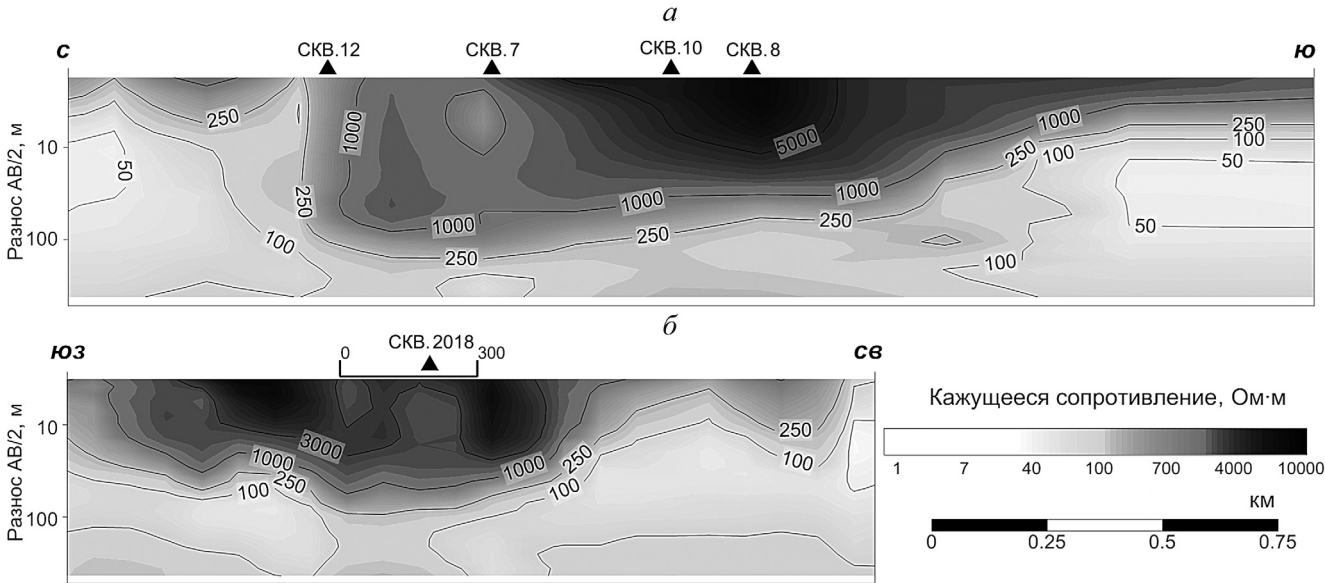


Рис. 3. Псевдоразрезы кажущихся сопротивлений по профилям ВЭЗ 1996 г. (а) и 2017 г. (б)

удары молотком массой 1 кг по наклонно установленному в грунт деревянному черенку.

Прием колебаний осуществлялся с помощью электродинамических сейсмоприемников GS-20DX с горизонтальной (Y-компонента) осью максимальной чувствительности. Сейсмоприемники GS-20DX обладают частотной характеристикой с собственной частотой 10 Гц, которая обеспечивает равномерность в полосе частоты 10–500 Гц, что позволяет принимать в неис-

каженном виде колебания от описанного выше источника продольных волн. Шаг по пунктам возбуждения и приема составлял 2 м, по общим глубинным точкам — 1 м.

В качестве регистрирующей аппаратуры для производства сейсморазведочных работ использовали 48-канальную цифровую сейсморазведочную станцию «ЭЛЛИСС-3» (ООО «Геосигнал», г. Москва). Формат записи — SEG-Y, шаг дискретизации — 0,5 мс; время записи — 511,5 мс.

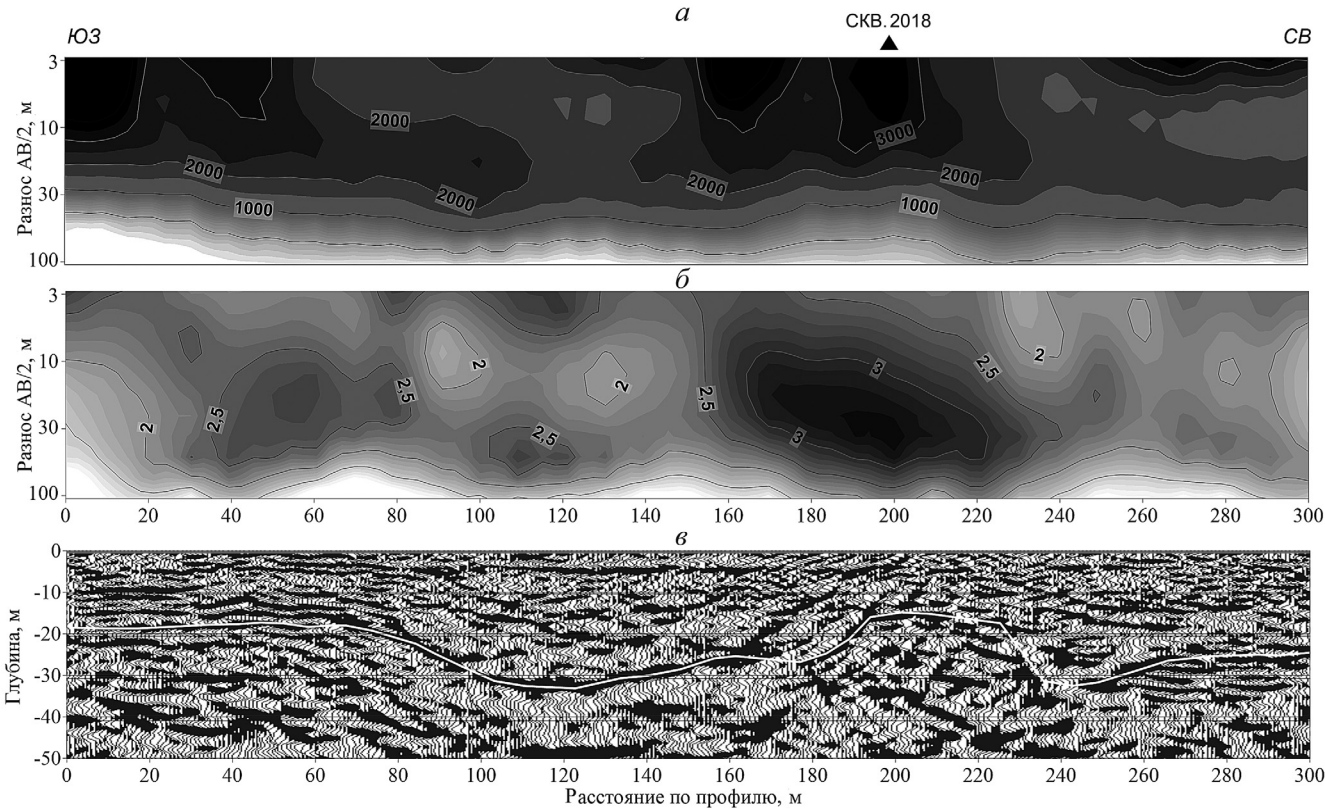


Рис. 4. Псевдоразрезы кажущегося сопротивления (а), кажущейся поляризуемости на задержке 0,1 с по данным электротомографии (б) и глубинный сейсмический разрез по данным ОГТ (в)

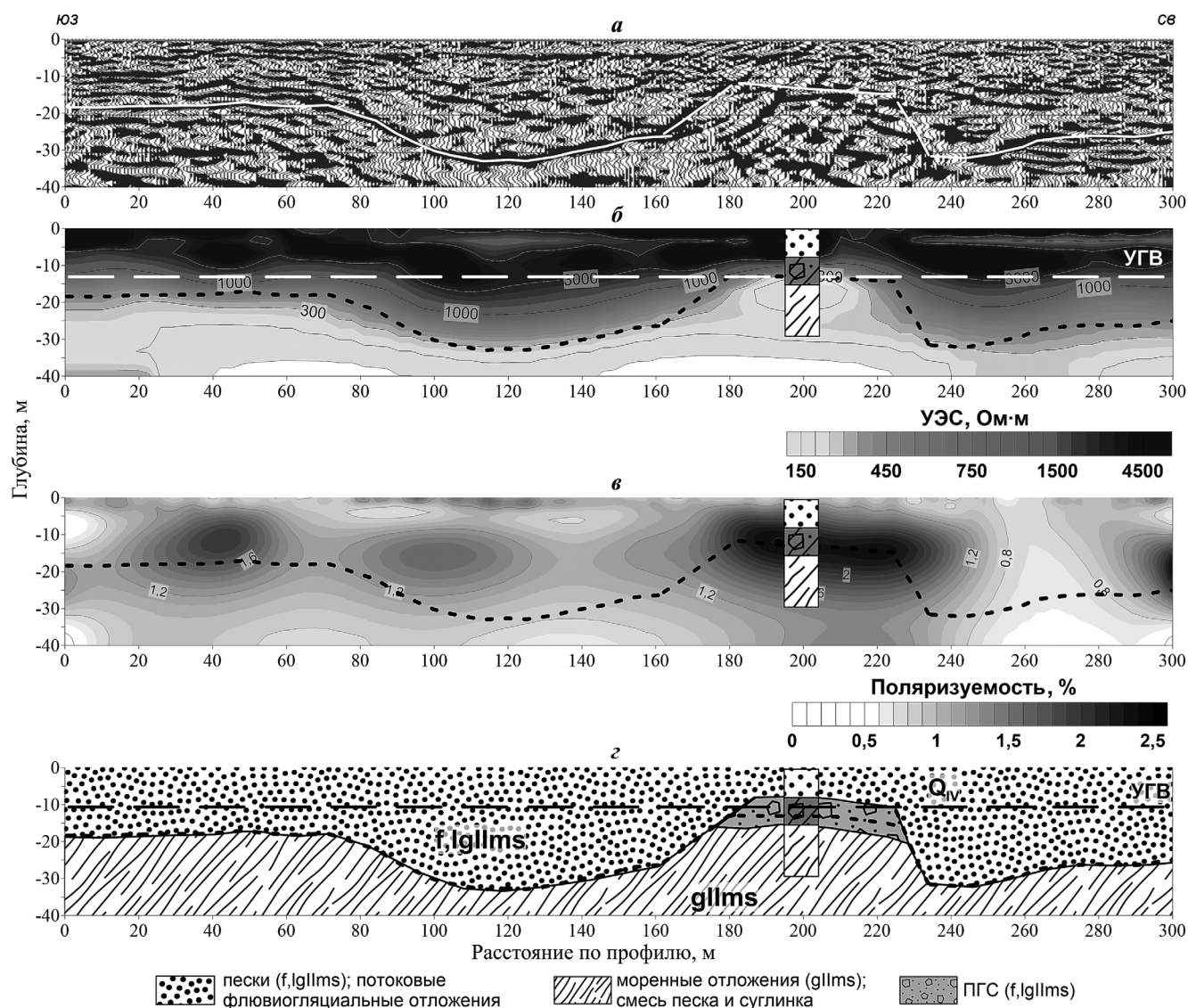


Рис. 5. Глубинный сейсмический разрез по данным ОГТ (а), модели УЭС (б) и поляризуемости (в) по результатам 2D инверсии данных ЭТ; геолого-геофизическая модель (г)

Результаты исследований и их обсуждение.

Сейсморазведка. Глубинный разрез по результатам ОГТ, полученный после углубленной обработки и введения поправок, представлен на рис. 4, в. Разрез можно разбить на несколько участков с определенным характером отражающих сейсмических границ.

Первый участок, соответствующий расстоянию по профилю от 0 до 80 м, характеризуется горизонтально-слоистым разрезом. Тонкая слоистость особенно хорошо выделяется в приповерхностной части разреза (0–20 м), относящейся к потоковым флювиогляциальным песчаным отложениям. В диапазоне расстояния от 80 до 180 м на разрезе наблюдается линзовидная структура, которая предположительно связана с увеличением мощности песков до 30 м. Участок профиля, соответствующий дистанциям от 180 до 240 м, отличается наиболее сложным строением. На разрезе выделяется «трапецеобразная» структура, в пределах которой нарушена горизонтальная слоистость.

Именно этому участку отвечает интенсивная аномалия кажущейся поляризуемости (рис. 4, б). В восточной части профиля начиная с 240 м и до конца профиля наблюдается плавный переход к горизонтально-слоистому разрезу.

Электроразведка. Двумерная инверсия данных электротомографии осуществлялась в программе ZondRES2D (А.Е. Каминский, г. Санкт-Петербург). Стартовая модель — полупространство с сопротивлением 100 Ом·м. Модель распределения значений удельного сопротивления, полученную по результатам 2D инверсии данных электротомографии, в первом приближении можно охарактеризовать как двухслойную. Верхний слой с высоким сопротивлением отвечает флювиогляциальным пескам. Уменьшение сопротивления песков с глубиной связано с обводненностью нижних горизонтов. Пески залегают на моренных проводящих суглинках. Мощность песков изменяется от 12 до 30 м. Максимальная мощность наблюдается на расстоянии 100–140 и 230–260 м по профилю, минимальная

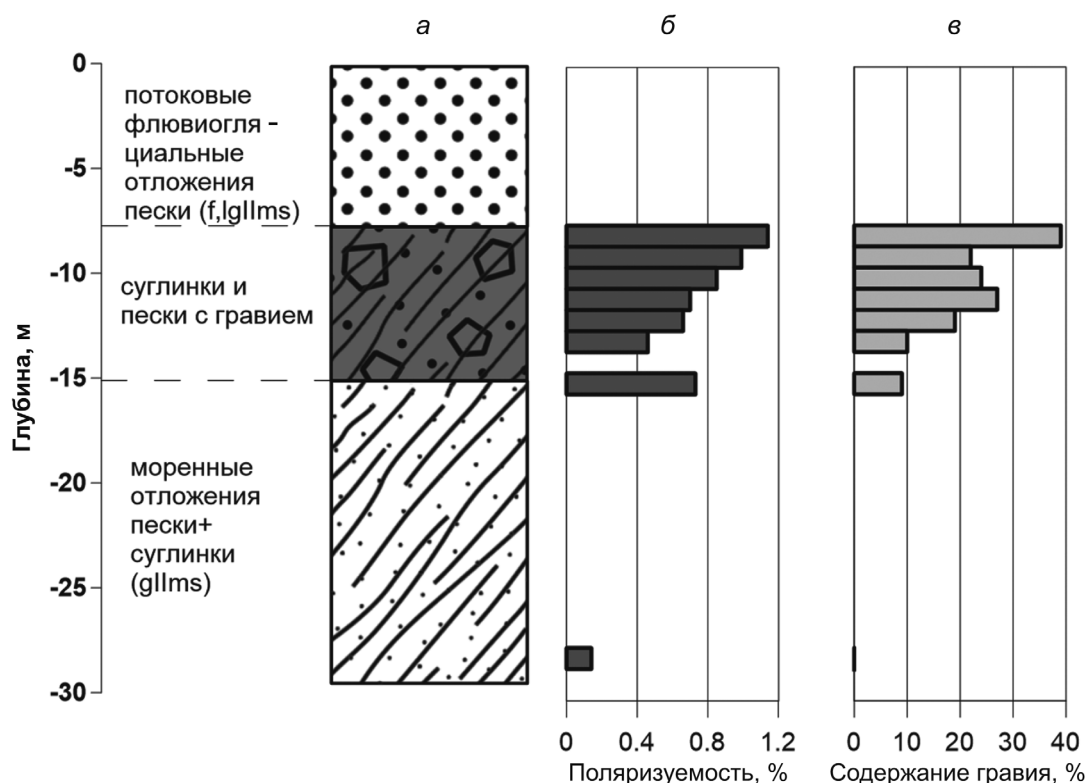


Рис. 6. Литологическая колонка по скважине 2018 г. (а) и результаты лабораторных измерений образцов керна: б — поляризуемость, в — содержание гравия по результатам гранулометрического анализа

мощность зафиксирована над трапециеобразной структурой на участке профиля 180–200 м. На модель распределения удельного электрического сопротивления (УЭС) пунктирной линией (рис. 5, б) вынесена граница подошвы песчаного тела, построенная по результатам ОГТ, которая практически совпадает с нижней границей высокоомного слоя по изолинии $\rho_k=300$ Ом·м.

На рис. 5, в показана глубинная поляризационная модель, построенная по данным кажущейся поляризуемости на задержке 0,1 с. На ней можно выделить несколько локальных областей, в пределах которых отмечена повышенная электрическая поляризуемость пород. Самые высокие значения поляризуемости ($\eta > 2\%$) относятся к участку профиля 190–230 м, к кровле трапециеобразной структуры, выделенной по результатам ОГТ и характеризующейся низкими значениями УЭС (рис. 5, б). Глубина, на которой фиксируются максимальные значения поляризуемости, составляет 10–15 м.

Обобщив данные по всему профилю и по всем разностям, можно сказать, что спад поля ВП носит быстрый характер. Максимум производной (T_0) кривой спада приходится на времена 5–30 мс. В районе интенсивной аномалии (участок профиля 190–230 м) спад поля ВП замедляется, значения T_0 увеличиваются до 100–200 мс.

Для уточнения природы комплексной геофизической аномалии в районе 200 м на профиле была пробурена разведочная скважина глубиной

30 м. Литологический разрез по скважине 2018 г. приведен на сейсмических и электроразведочных разрезах.

Результаты бурения скважины в 2018 г. По результатам бурения разрез в центре аномалии выглядит следующим образом: 0–8 м — мелкозернистый песок; 8–15 м — смесь песка и суглинка с включениями гравия; 15–30 м — моренные отложения, представленные суглинками с отдельными прослоями песка. Уровень грунтовых вод (УГВ) находится на глубине около 9 м.

Для отдельных образцов керна, отобранных преимущественно из горизонта, характеризующегося высокой поляризуемостью, был выполнен ситовой гранулометрический анализ и проведены петрофизические измерения вызванной поляризации в лабораторных условиях. Результаты измерений на керне приведены на рис. 6, б, в.

Высокие значения поляризуемости наблюдаются для образцов керна, относящихся к интервалу глубины 8–15 м, который представлен песчано-гравийной смесью с содержанием гравия от 20 до 40%. Образец с самым высоким содержанием гравия (38%) имеет поляризуемость 1,2%, образцы с содержанием гравия около 20% характеризуются значениями $\eta \approx 0,7 \div 1,1\%$ (рис. 6, в). В залегающих ниже моренных суглинках поляризуемость уменьшается до фоновых значений (0,4–0,6%).

Итоговая геолого-геофизическая модель. Результаты наземных геофизических работ и измерений на образцах керна, а также материалы

исследований 1996 г. на рассматриваемом объекте позволяют построить прогнозную геолого-геофизическую модель вдоль профиля № 1 (рис. 5, з).

Профиль длиной 300 м расположен в пределах крупного песчаного тела, образованного потоковыми флювиогляциальными отложениями. Суммарная мощность песчаных отложений вдоль профиля изменяется от 20 до 30 м. Минимальная мощность песков фиксируется на юго-западном фланге профиля, максимальная на участках 100–140 и 240–250 м. Уровень грунтовых вод находится на глубине ~10 м от поверхности. Удельное электрическое сопротивление сухих песков составляет $n \cdot 10^3$ Ом·м. Ниже уровня УГВ происходит понижение сопротивления песчаной толщи до 500–1000 Ом·м. Пески подстилаются моренными суглинками, которые характеризуются низкими значениями удельного сопротивления — 50–100 Ом·м.

На участке профиля 180–240 м в разрезе присутствует неоднородность, которая проявляется на сейсмическом разрезе в виде нарушения горизонтальной слоистости отражающих горизонтов (рис. 5, а). По результатам электротомографии область неоднородности характеризуется низкими значениями сопротивления (рис. 5, б), а к ее кровле приурочена зона повышенных значений поляризуемости (рис. 5, в).

Результаты разведочного бурения в центре аномалии показали, что низкие величины сопротивления связаны с моренными суглинками, которые на этом участке образуют структуру внедрения типа гляциодиапира [Лаврушин, 1976]. Повышенные значения поляризуемости связаны с горизонтом песчано-гравийной смеси, расположенным непосредственно над слоем суглинков в интервале глубин 8–13 м, что подтверждается лабораторными измерениями ВП на образцах керн.

Заключение. Несколько лет назад группой сотрудников и аспирантов кафедры геофизики геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова было выдвинуто предположение, что

в пределах отложений песчано-гравийной смеси участки с высоким процентным содержанием гравия магматического происхождения (20–50%) характеризуются повышенными значениями электрической поляризуемости. Это предположение возникло вследствие обобщения результатов электроразведочных работ, выполненных на месторождениях и рудопроявлениях ПГС на территории Калужской области [Куликов и др., 2016]. Повышенный уровень ВП связан, по нашему мнению, с включениями электропроводящих минералов в гравийной фракции.

Общеизвестно, что при увеличении процентного содержания гравия увеличивается УЭС песчано-гравийной смеси. Например, для сухих смесей типично увеличение с $\rho=500 \div 1000$ над песками до $\rho=2000 \div 3000$ Ом·м над богатыми ПГС. Учитывая логнормальный характер распределения УЭС, такие изменения на результатах зондирований будут приводить к аномалиям кажущегося сопротивления в 10–15%.

В качестве дополнительного поискового критерия мы предлагаем рассматривать положительные аномалии кажущейся поляризуемости. Преимущество комплексного анализа двух параметров заключается в том, что уровень поляризуемости над областями с высоким содержанием гравия может отличаться от фоновых значений над остальной частью ПГС в 1,5–2 раза.

Это предположение неоднократно подтверждено результатами детальных электроразведочных работ методом электротомографии с измерением вызванной поляризации и петрофизическими измерениями на образцах ПГС [Куликов и др., 2016, 2017].

Представленные результаты комплексных геофизических работ по изучению контрастной аномалии ВП, выявленной на левобережье р. Угра, еще раз подтвердили выводы, сделанные ранее. Высокие значения поляризуемости связаны с линзой богатой песчано-гравийной смеси (содержание гравия 20–40%), локализованной на глубине 8–13 м в кровле локальной гляциопротрузии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Алексеев А.С., Шик С.М., Кабанов П.Б. Геологическое строение участка «Александровка». М.: МГУ, 1996. 68 с.

Куликов В.А., Аношина С.А., Соловьева А.В., Яковлев А.Г. Использование метода вызванной поляризации при изучении песчано-гравийных отложений // Инженерные изыскания. 2016. № 14. С. 42–49.

Куликов В.А., Аношина С.А., Соловьева А.В. Результаты использования метода ВЭЗ-ВП при изучении песчано-гравийных смесей на территории Мосальского

района Калужской области // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2016. № 2. С. 52–58.

Куликов В.А., Аношина С.А., Соловьева А.В. Результаты опытных работ методом ЭТ-ВП на месторождении песчано-гравийных отложений Вязищи в Калужской области // Инженерные изыскания. 2017. № 8. С. 44–54.

Лаврушин Ю.А. Строение и формирование основных морен материковых оледенений. М.: Наука, 1976. 237 с. (Тр. ГИН; Вып.288).

Поступила в редакцию 15.09.2018

Поступила с доработки 23.11.2018

Принята к публикации 12.12.2018